DOI: 10.20103/j.stxb.202212163611

李虹,张红,贺桂珍,张霄羽,刘勇.基于主体功能区的山西省碳排放时空特征及减排评价.生态学报,2024,44(1):143-153. Li H, Zhang H, He G Z, Zhang X Y, Liu Y.Spatio-temporal characteristics and reduction evaluation of carbon emission from the perspective of Major Function Oriented Zones, Shanxi Province.Acta Ecologica Sinica,2024,44(1):143-153.

基于主体功能区的山西省碳排放时空特征及减排评价

李 虹¹,张 红^{1,2,*},贺桂珍^{3,4},张霄羽¹,刘 勇²

1山西大学环境与资源学院,太原 030006

2 山西大学黄土高原研究所,太原 030006

3 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

4 中国科学院大学,北京 100049

摘要:碳排放核算是落实温室气体减排目标、应对气候变化和实现可持续发展的重要基础。碳排放强度的变化趋势体现了碳减 排成效,是主体功能区未来减排措施和低碳发展道路的选择与调整的重要依据。以我国典型高碳经济省份山西省为研究对象, 采用 BP 神经网络模型,基于市级碳排放量、人口、GDP、夜间灯光总值、植被覆盖率、城市化水平构建了适用于主体功能区的碳 排放核算模型,运用探索性空间数据分析、Dagum 基尼系数和时间倾向率等方法,分析了主体功能区碳排放时空特征、碳排放区 域差异并评价碳减排成效。结果表明:(1)从时间趋势来看,2006—2020 年各主体功能区碳排放量呈现逐年增长的趋势,其增 长率均表现为重点开发区域(48.08%)>农产品主产区(38.13%)>重点生态功能区(33.95%)的特征,与各区域的功能定位和产 业结构显著相关。(2)从空间演变来看,主体功能区的空间集聚特征与山西省"两山夹一川"的独特地势相关。重点开发区域 空间集聚格局较为稳定,集中在山西省中部,而农产品主产区、重点生态功能区的集聚特征不显著,分布在东部和西部。(3)碳 排放区域差异分析表明山西省碳排放地区间总体差异呈现下降趋势,总体基尼系数由 2006 年的 0.505 下降到 2020 年的 0.498, 年均下降 0.102%,重点开发区域和重点生态功能区之间的差异是总体差异的主要来源。(4)碳减排效果评价显示主体功能区 碳排放强度均呈现下降趋势,重点开发区域的碳减排成效显著高于农产品主产区和重点生态功能区。基于对主体功能区碳排 放的分析,结合其功能定位,针对性地提出主体功能区减排和低碳发展措施。本文为我国能源资源型省份制定和实施差异化节 能减排政策提供了科学参考。

关键词:碳排放;减排评价;主体功能区;山西省

Spatio-temporal characteristics and reduction evaluation of carbon emission from the perspective of Major Function Oriented Zones, Shanxi Province

LI Hong¹, ZHANG Hong^{1,2,*}, HE Guizhen^{3,4}, ZHANG Xiaoyu¹, LIU Yong²

1 College of Environment and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Carbon emission accounting is an important basis for achieving greenhouse gas emission reduction goals. Clarifying the change of carbon emission intensity and evaluating the effectiveness of carbon emission reduction is vital to implement low-carbon development measures from the point of view of the Major Function Oriented Zones (MFOZs). This study took Shanxi Province, a typical province with high carbon economy, as the research object. In the MFOZs, the BP

收稿日期:2022-12-16; 网络出版日期:2023-09-28

基金项目:国家自然科学基金(U1910207);城市与区域生态国家重点实验室开放基金(SKLURE2022-2-2)

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhanghong@ sxu.edu.cn

neural network model was adopted to build a carbon emission accounting model based on the district level carbon emission. population, GDP, the sum of digital number, vegetation coverage, and urbanization level. Using the methods of spatial auto-correlation analysis, Dagum Gini coefficient, and time propensity rate, this paper analyzed the carbon emission spatiotemporal characteristics and its regional differences, and evaluated the effectiveness of carbon emission reduction of the MFOZs in Shanxi Province. The results showed that: (1) from the perspective of time, the carbon emissions of the MFOZs presented an increasing trend from 2006 to 2020. The growth rate was in the order of the key development zone (48.08%)> the main agricultural production zone (38.13%) > the key ecological functional zone (33.95%), which was significantly related to the functional positioning and industrial structure of the MFOZs. (2) In terms of spatial evolution, the spatial agglomeration characteristics of the MFOZs were linked to the unique topography of Shanxi Province. The spatial agglomeration pattern of the key development zone was relatively stable, while the main agricultural production zone and the key ecological functional zone were not significant. (3) The overall differences of carbon emissions in Shanxi Province presented a downward trend, and the total Gini coefficient decreased from 0.505 in 2006 to 0.498 in 2020, with an averagely annual decline of 0.102%. The difference among the MFOZs, especially the difference between the key development zone and the key ecological functional zone, was the main source of the overall difference. (4) The carbon emission intensity of the MFOZs exhibited on the decline, and the effectiveness of carbon emission reduction of the key development zone was significantly better than the main agricultural production zone and the key ecological functional zone. Based on the analysis of the carbon emission and combined with functional positioning of the MFOZs, the targeted measures for emission reduction and low-carbon development of the MFOZs were proposed. It is of scientific reference value to formulate and implement the differentiated energy saving and emission reduction policies for the Chinese energy resourcebased provinces.

Key Words: carbon emissions; reduction assessment; Major Function Oriented Zones; Shanxi Province

自 20 世纪中叶以来,人类活动导致以 CO₂为主的温室气体含量增加,造成温室效应加剧,全球气温上升, 对大气、海洋、冰冻圈和生物圈等自然生态系统产生前所未有的影响^[1]。气候变化作为全球性问题,需要世 界各国携手应对。作为世界上最大的发展中国家和 CO₂排放国,中国在 2020 年 9 月明确提出 2030 年"碳达 峰"与 2060 年"碳中和"目标、国家自主贡献力度新目标^[2],这不仅是推动生态环境质量改善和实现可持续发 展的内在要求,也展现了中国深度参与全球气候治理的责任担当^[3]。中国各级行政区的资源禀赋、能源消费 结构、经济发展水平在一定程度上决定了传统的以行政区划为实施单元不能完全适应碳减排政策的制定和实 施,亟需探讨实现双碳目标的可行政策路径。主体功能区是根据县域的资源环境承载能力、现有开发密度和 发展潜力而划分的^[4],因此从主体功能区角度研究碳排放,有利于打破行政区划,因地制宜地制定并实施有 差异性的碳减排政策,推动中国双碳目标的实现,适应和减缓气候变化。

鉴于全球能源部门的碳排放占 CO₂总排放量的 90%以上,国内外学者多围绕化石能源消费所产生的碳排 放问题展开研究,主要集中在国家、省级尺度。国家尺度上,世界各国的碳排放研究基于国际上的温室气体数 据集^[5],包括美国能源信息署(EIA)、全球大气研究排放数据库(EDGAR)、全球碳预算数据库(GCB)、国际能 源署(IEA)等数据集。Koilakou、Fang 等分别使用 IEA 的碳排放数据分析美国和德国碳排放的驱动因素、比较 中国和美国碳排放及影响因素的差异^[6-7];Dong 等^[8]基于 EIA 碳排放数据评估了 32 个发达国家在 1990— 2017 年期间的碳排放效率;Zhang 等^[9]利用 EDGAR 的温室气体排放数据分析 1970—2018 年全球主要国家不 同情景下的碳排放配额。省级尺度上,一些学者参考 IPCC 国家温室气体清单指南,使用《中国能源统计年 鉴》中的能源消费数据进行碳排放核算,从碳排放强度的角度分析时空演变特征^[10]、采用 LMDI 法研究碳排 放的驱动因素^[11]、分析城市发展与能源碳排放的关系^[12]。

由于能源消费数据的限制,县级尺度的碳排放核算大多使用自上而下的方法收集社会经济数据或点源数

据获得县级尺度碳排放量^[13-16],这种方法忽略了县域经济与工业之间的异质性,使得估算值与实际碳排放偏差较大^[17]。此外夜间灯光数据也被选择用于碳排放的降尺度研究,苏泳娴等^[18]基于 1992—2010 年 DMSP/OLS 夜间灯光影像,建立省级尺度夜间灯光总值与碳排放量之间的线性相关关系模拟市级碳排放量;Chen 等^[19]采用 PSO-BP 算法基于夜间灯光数据对全省能源碳排放进行降尺度研究,并计算 1997—2017 年全国 2375 个县的能源相关碳排放量。也有学者考虑到不同主体功能区国土空间开发目标、经济发展状况及能源 消费结构的差异,在县级尺度碳排放核算的基础上,分析四川省^[20]、广东省^[21]、京津冀城市群^[22]主体功能区 碳排放的时空演变特征。

山西省是典型的资源型和高碳经济省份,经济结构和产业结构长期依赖煤炭,碳排放总量、人均碳排放、 碳排放强度长期居全国前列^[23]。田云等^[24]研究表明山西省呈现出较为明显的"高排放、低配额"特征,且碳 减排潜力相对较小,在实施碳减排措施、推动低碳转型以及最终实现双碳目标等方面面临着严峻的考验。因 此本文立足山西省经济发展和碳排放的特征,从主体功能区的视角出发,采用 BP 神经网络模型,构建了适用 于主体功能区的碳排放核算模型,对山西省重点开发区域、农产品主产区、重点生态功能区 2006—2020 年碳 排放进行核算,分析碳排放时空演变特征、碳排放区域差异及来源、碳减排成效,有利于促进主体功能区之间 资源整合和协同减排,为山西省碳减排政策和低碳发展道路的制定提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

山西省总面积 15.67 万 km²,共辖 11 个地级市,117 个县区,含煤面积约占全国总面积的 40%,探明储量 约占全国的 1/3,煤炭资源丰富,是我国重要的能源生产基地及典型的资源型省份,经济发展高度依赖能源, 总能源消耗较大,导致其碳排放量大于其他省份,减排压力巨大。本文以《山西省主体功能区规划》^[25]中的 重点开发区域、农产品主产区和重点生态功能区开展研究,三大主体功能区分别包含 37、34、46 个县区级行政 单元,占省域面积的 20.15%、28.65%和 51.2%(图 1)。

1.2 数据来源

本文分别采用 IPCC 清单法和 BP 神经网络计算市级和县级碳排放,县级碳排放加总得到主体功能区的 碳排放。用于市级碳排放核算的数据包括能源消费数据^[26-27]和排放因子,考虑到某些能源的消耗量小,而且 质量与其他燃料相似,将其合并为 17 种类型^[28],排放因子采用 Liu 等^[29]对国内煤矿和煤炭样品分析检测得 出的实际排放因子;用于县级碳排放估算的数据包括人口、GDP、夜间灯光总值、植被覆盖率、城市化水平, DMSP-OLS(30")、NPP-VIIRS(15")夜间灯光数据分别经过裁剪、重投影、重采样、去除异常值等预处理使两种 影像达到空间匹配后进行相互校正^[30]。数据来源说明见表 1。

Table 1 Data sources							
一 碳排放核算体系 Carbon omission accounting system	数据 Date	来源 Source					
		Source					
市级碳排放核算	原煤、洗精煤、原油等能源消费数据	《中国能源统计年鉴》(http://www.stats.gov.cn/)					
Carbon emission accounting at city level	排放因子	Liu ^[29]					
县级碳排放估算	人口	《山西统计年鉴》http://tjj.shanxi.gov.cn/					
Carbon emission accounting at county level	地区生产总值						
	植被覆盖率	Zenodo 土地利用数据(30m)(https://zenodo.org/)					
	城市化水平						
	夜间灯光数据	美国国家地球物理数据中心 (https://www.ngdc.noaa.gov/)					

表1 数据来源



图 1 山西省主体功能区划图 Fig.1 Map of the MFOZs in Shanxi Province MFOZs: 主体功能区 Major function oriented zones

1.3 研究方法

1.3.1 主体功能区碳排放核算

主体功能区以县级行政单位为基本单元,由于县级能源消费数据的不可获取性,无法直接计算其碳排放量,本文首先基于 IPCC 指南中的方法 2(即采用特定国家排放因子)和省级温室气体清单编制指南(试行), 计算山西省各市 2000—2020 年能源相关碳排放,其公式如下:

$$CE_{\text{energy}} = AD_i \times EF_i \tag{1}$$

式中, CE_{energy} 为能源相关 CO_2 排放量(Mt); AD_i 为 i 类能源的活动数据即消费量, 按标准煤计算(Mt), 包括终端 消费(除用作原料、材料的部分)和火力发电、供热两个过程^[31]; EF_i 为 i 类能源的排放因子(表 2)。

Table 2 Emission factors for different energy								
能源名称	排放因子 10 ⁴ C/10 ⁴ t 标准煤	能源名称	排放因子 10 ⁴ C/10 ⁴ t 标准煤					
Energy	Emission factors	Energy	Emission factors					
原煤 Raw coal	1.83	汽油 Gasoline	2.99					
洗精煤 Cleaned coal	2.31	煤油 Kerosene	3.1					
其他洗煤 Other washed coal	1.33	柴油 Diesel oil	3.12					
型煤 Briquettes	1.6	燃料油 Fuel oil	3.26					
焦炭 Coke	2.96	其他石油制品 Other petroleum products	3.12					
焦炉煤气 Coke oven gas	11.67	液化石油气 Liquefied petroleum gas	3.15					
其他煤气 Other gas	6.02	炼厂干气 Refinery gas	3.38					
其他焦化产品 Other coking products	2.59	天然气 Natural gas	2.16					
原油 Crude oil	3.1							

表 2 能源排放因子

其次通过 BP 神经网络估算 2006—2020 年山西省县级 CO₂排放量^[32], BP 神经网络是一种按照误差逆向 传播算法训练的多层前馈神经网络,由输入层、输出层和隐含层组成。在本研究中,输入层为碳排放影响因 子,包括人口、GDP、夜间灯光总值、植被覆盖率、城市化水平,输出层为碳排放量,训练样本、测试样本分别占 70%、30%,训练集、测试集的相关系数 R 分别为 0.995、0.990,验证集和总样本的相关系数 R 分别为 0.986、 0.993。然后通过该模型估算了山西省 2006—2020 年县级 CO₂排放量。BP 神经网络模拟在 MATLABR2018b 中实现。最后根据主体功能区规划将对应县域的碳排放汇总,得到重点开发区域、农产品主产区、重点生态功能区的碳排放。

1.3.2 空间自相关分析

空间自相关是一种探究地理现象属性因空间位置而产生相关性程度的空间分析方法,可以解释地理现象的空间分布特征、相关程度和聚集性。本文选择空间自相关 Moran I 指数分析碳排放高值或低值的空间集聚特征,Getis-Ord G*进一步分析局部空间集聚特征,识别具有统计显著性的高值和低值的空间聚类,即碳排放 热点区与冷点区的空间分布。

1.3.3 碳排放区域差异分析

采用 Dagum 基尼系数及其按子群分解的方法计算山西省 2006—2020 年碳排放空间分布的基尼系数并 从主体功能区角度对总体基尼系数进行分解,该方法克服了标准差、基尼系数、变异系数等传统测算变量空间 非均衡性方法仅考虑总体差异的弊端,已广泛用于研究区域差异^[33]。Dagum 基尼系数将总体差异(*G*)分解 为区域内差异(*G_w*)、区域间差异(*G_{ub}*)和超变密度(*G_t*)三部分,基尼系数的定义如公式(2)所示,具体计算方 法见文献^[34]。

$$G = \frac{\sum_{j=1}^{k} \sum_{h=1}^{k} \sum_{i=1}^{n_{j}} \sum_{r=1}^{n_{h}} |y_{ji} - y_{hr}|}{2n^{2}\bar{\gamma}} = G_{w} + G_{nb} + G_{l}$$
(2)

式中,*G*表示山西省碳排放的总体基尼系数,*n*是县区的个数(*n*=117),*k*是主体功能区个数(*k*=3),*n*_j是第*j* 个主体功能区内县区个数,*n*_k是第*h*个主体功能区内县区个数,*y*_{ji}是第*j*个主体功能区内第*i*个县区的碳排 放,*y*_{ki}是第*h*个主体功能区内第*r*个县区的碳排放,*y*是山西省三大主体功能区 117 个县区碳排放的平均值。 **1.3.4** 碳减排成效评价

碳排放强度变化倾向率体现其在时间序列下的变化趋势,可以检验碳减排成效,本文采用线性拟合方程 的斜率表征碳排放强度的变化趋势和幅度,在给定 α=0.05 的置信水平下,对碳排放强度时间序列变化趋势 的显著性进行判断。计算公式为:

slope =
$$\frac{n \times \sum_{i=1}^{n} (t \times CEI_{i}) - \sum_{i=1}^{n} t \sum_{i=1}^{n} CEI_{i}}{n \times \sum_{i=1}^{n} t^{2} - (\sum_{i=1}^{n} t)^{2}}$$
(3)

式中,n为研究期长度(本研究 n=15),t 代表时间序列,CEI,为第 t 年碳排放强度,slope 表示碳排放强度变化的趋势。如果 slope>0 表示研究期间碳排放强度呈现增长趋势,说明该地区碳减排无效,slope<0 则表示研究期间碳排放强度呈现减小趋势,该区域碳减排有效。

2 结果分析

2.1 主体功能区碳排放时空演变特征

2.1.1 碳排放时间演变特征

近15年来山西省主体功能区的碳排放量呈现逐年增长的趋势,增长率表现为重点开发区域>农产品主产区>重点生态功能区的特征(图2),与各主体功能区的功能定位和产业结构显著相关(图3)。重点开发区域 是碳排放主要区域,其排放量占全省的比重稳定在60%左右,总体呈增长趋势且增速最快,从2006年的 233.92 Mt增长到 2020 年的 477.67 Mt。作为山西省经济最发达的地区,重点开发区域 GDP 总量最高,产业结构以二三产业为主,碳排放与第二、第三产业产值的相关性最强,人口密集、能源消费总量大、城市化水平高,因此排放量最大且增速最快。

农产品主产区和重点生态功能区的碳排放量明显低于重点开发区域,分别占山西省碳排放总量的 25% 和 12%左右。农产品主产区以发展农业和提供农产品为主要功能,第一产业产值与碳排放的相关性是三大 主体功能区中最强的,由于推进落实农业低碳技术,增加农田有机质含量,巩固和提升农田生态系统碳汇能 力,故碳排放增速缓慢^[35];重点生态功能区的碳排放量同样表现出随时间连续增长的趋势,碳排放与第三产 业产值的相关性最高,是山西省生态系统保护的关键区域,工业活动少,林草覆盖率高,以提供生态服务为主, 故碳排放总量增速缓慢。









图 3 主体功能区碳排放与各产业产值的 Person 相关系数(P<0.01)



2.1.2 碳排放空间集聚特征

采用空间自相关方法分析主体功能区碳排放在空间上的集聚特征,从山西省碳排放局部空间自相关分布 图看(图4),高-高聚集区、低-高聚集区都分布在重点开发区域,其中太原都市圈的高-高聚集现象未发生变 化,说明该区域的空间集聚格局较为稳定,存在"高碳锁定"效应,分布在山西省太原盆地、临汾盆地和大同盆 地,由于地势优势,人口、经济不断集聚在此区域,逐渐陷入高碳排放的困境;晋北、晋南、晋东南城镇群中的重 点开发区域的空间自相关性减弱,由高-高集聚转变为不显著,这反映了三大城镇群产业结构的转型升级、绿 色低碳技术的规模化应用、与太原都市圈的融合发展带来的集聚效应等因素,对晋北、晋南、晋东南地区的碳 排放产生负影响,从而使这些地区碳集聚效应减弱。高-高区域在中心相互作用,集中和消耗更多的资源,低-高区域在重点开发区域的边缘地区,优先保障高-高区域的发展,能源消耗量较少。农产品主产区、重点生态 功能区的县域经济发展不平衡,碳排放存在空间差异性,集聚特征不显著。主体功能区的空间集聚特征与山 西省"两山夹一川"的独特地势相关^[36],空间集聚特征稳定的区域集中在山西省中部,集聚特征不显著的区 域分布在东部和西部。





计算 Getis-Ord G*得到山西省碳排放冷热区分布图(图 5),热点图分析表明山西省碳排放整体上呈现核 心-边缘结构,以重点开发区域中的太原都市圈为热点区,向外逐渐扩散,依次为次热区、次冷区、冷点区;晋 北、晋东南城镇群形成次级核心。2006—2020 年热点区范围扩大且更加集聚,分布在重点开发区域。太原都 市圈是人口和经济密集区,晋北、晋东南城镇群是工业密集区,城市化和工业化的快速发展伴随能源消费量的 增长,导致该区域成为山西省碳排放的高值区。



Fig.5 Distribution of carbon emissions hot spots in the MFOZs of Shanxi Province

http://www.ecologica.cn

2.2 主体功能区碳排放差异及来源分解

为了进一步分析山西省主体功能区碳排放分布的区域差距,根据基尼系数及其按子群分解的方法,分别 测算了 2006—2020 年山西省碳排放总体基尼系数并按照重点开发区域、农产品主产区、重点生态功能区三大 区域进行了分解(图 6)。研究期间山西省主体功能区碳排放的总体差异表现为下降趋势,由 2006 年的 0.505 下降到 2020 年的 0.498,年均下降 0.102%,说明山西省县区碳排放之间存在较为明显的不均衡现象,且不均 衡程度有缩小的趋势,原因是各县区的经济发展趋于平衡导致碳排放量的差异减弱。



图 6 Dagum 基尼系数分解结果 Fig.6 Dagum Gini coefficient decomposition results

从主体功能区的差异来看,重点开发区域、重点生态功能区碳排放的区域内差异逐年上升,年均增长率分别为1.47%、0.95%,而农产品主产区呈现下降的趋势,年均下降2.55%,主要原因是重点开发区域内产业转型和能源结构优化的步调不一致,太原城市群以高新技术产业为经济支柱,晋北、晋南、晋东南三大城镇群依赖于传统煤化工产业和制造业,能源消费量大,使得区域内碳排放的差异增大。

主体功能区之间的差异见图 6,从差异的数值水平来看,重点开发区域和重点生态功能区之间的差异较大,其研究期内均值达到 0.730,重点开发区域和农产品主产区、农产品主产区与重点生态功能区之间的差异较小,样本均值分别为 0.478、0.527,这与主体功能区经济发展不平衡、能源消费总量的差异密切相关;从差异的时间变化趋势来看,整体上农产品主产区与重点生态功能区、重点开发区域和重点生态功能区的地区间差异呈现下降趋势并同步变化,年均下降分别为 1.127%、0.127%,重点开发区域和农产品主产区的地区间差异 波动幅度较小,表现为上升趋势,年均增长率为 0.153%。

进一步分析主体功能区碳排放差异的来源及贡献率(图6),区域内差异的贡献呈现上升趋势,由2006年的20.242%上升到2020年的21.443%,年均增长率为0.413%;超变密度反映的是主体功能区之间交叉重叠部分对于总体差异的贡献,其贡献率在7%上下波动,呈现明显的倒"U"形特征;区域间差异的贡献率呈现下降趋势,由2006年的72.272%下降至2020年的71.516%,始终高于区域内差异和超变密度对碳排放总体差异的贡献,是山西省碳排放总体差异的主要来源。

2.3 主体功能区碳减排成效评价

碳排放强度是指单位 GDP 的碳排放量,是衡量能源强度、碳排放效率和碳减排成效的重要指标。研究期间

重点开发区域和农产品主产区的碳排放强度高于全省水平,三类主体功能区的碳排放强度均呈现逐年下降趋势(图7),重点生态功能区的下降幅度最大(51.43%),农产品主产区次之(46.61%),重点开发区域最小(45.84%)。

进一步分析碳排放强度年际变化趋势,2006—2020 年主体功能区碳排放强度呈显著下降趋势的(P<0.05) 区域占比排序为:重点开发区域(97.30%)>重点生态功 能区(95.65%)>山西省(95.73%)>农产品主产区 (94.12%)(表3),重点开发区域的碳减排成效显著高 于农产品主产区和重点生态功能区。从空间上看 (图8),重点开发区域整体碳减排成效较好,太原市作 为以"资源型城市转型升级"为主题的国家可持续发展 议程创新示范区,可持续发展战略辐射重点开发区域, 大力发展新能源,推动能源清洁低碳转型,能源利用效 率提高,单位产出能源资源消耗和碳排放强度降低;农





产品主产区和重点生态功能区的减排成效存在较大程度的空间异质性,紧邻太原都市圈的区域承担着向中心 区域输送资源的任务,制约了低碳经济的发展,碳排放强度下降缓慢,碳减排成效不容乐观。

	Table 3 Statistics of carbon emission intensity from 2006 to 2020						
Z Slope		碳减排成效	百分比 Percentage/%				
	Slope	pe 变化趋势	Carbon emission	重点开发区域	农产品主产区	重点生态功能区	山西省
	Changing trend	effectiveness	Key development zone	Main agricultural production zone	Key ecological functional zone	Shanxi Province	
<-1.96	<0	显著下降	有效	97.30	94.12	95.65	95.73
≥1.96	>0	显著上升	无效	2.70	5.88	4.35	4.27

表 3 2006—2020 年碳排放强度变化趋势统计



图 8 2006—2020 年山西省主体功能区碳排放强度倾向率空间分布图



3 讨论与结论

3.1 讨论

碳排放领域已成为国内外研究热点,然而以往研究大多以国家、省级尺度为主,较少从主体功能区尺度开

展研究。山西省是我国首个国家资源型经济转型综合配套改革试验区,实施双碳目标的"山西行动",有助于 推进全国碳达峰碳中和进程^[37]。本文从山西省主体功能区的碳排放入手,结合遥感数据和社会经济数据,通 过 BP 神经网络模型计算山西省县级尺度碳排放,进而分析了主体功能区的碳排放时空特征、碳排放区域差 异并评价碳减排成效,研究方法有一定的创新性,但是由于夜间灯光数据存在过饱和、精度低等缺点,未来可 以选择更高精度的数据,结合实地调研和碳排放在线监测,更准确地核算碳排放,为低碳发展战略提供强有力 的依据。

本文基于山西省各主体功能区碳排放的特征,结合其资源环境承载能力、现有开发强度、发展潜力和山西 省未来发展的战略规划,针对性地提出各主体功能区的减排建议:

重点开发区域近年来碳减排取得一定成效,未来应优化太原都市圈、三大城镇群的城镇化与工业化用地, 推进发展技术密集型产业;发挥平遥县、介休市、阳曲县等地旅游资源丰富的优势,大力推进产业结构转型升 级;对于太原市小店区、大同市平城区等人口密集的区县,推进自身的辐射带动作用,充分发挥人口集聚的规 模效应与创新优势对碳排放的负影响^[38],优化三生空间布局,建设低碳城市。

农产品主产区存在较强的城镇化发展潜力^[39],未来应严格控制城镇用地的扩张,落实主体功能区配套政策,因地制宜选择低碳发展路径,注意防范增排风险;优化农业用地布局,提升耕地质量,发展以阳高县现代农业产业链、高平市种养结合为案例的农业循环经济,提高农业资源的利用效率,推进农业碳减排;增加农田有机质含量,巩固和提升农田生态系统碳汇能力;加强绿色农业生产技术研究开发,增强农业生产适应气候变化的能力。

重点生态功能区应加强资源合理开发利用、新能源开发建设和生态修复,特别是晋城市沁水县、朔州市平 鲁区、吕梁市柳林县等煤炭产量较高的县区,能矿资源的开采必须以保护生态为前提,加强管控力度,严格按 照该区域的主体功能定位实行"点上开发、面上保护";立足资源优势和地理优势,以创新为驱动加快实现盂 县煤层气和地热能、平鲁区风电等地优质清洁能源的开发建设,提高能源利用效率,降低碳排放强度;建设以 吕梁山、太行山、太岳山、中条山为主体的生态屏障带,发挥湿地、森林、草原等生态系统的生态保育和水源涵 养功能,保障山西省生态安全的同时增加陆地生态系统碳汇。

3.2 结论

本文从主体功能区的视角出发,采用 BP 神经网络构建市级能源消费碳排放与人口、GDP、夜间灯光总 值、植被覆盖率、城市化水平的关系并间接估算 2006—2020 年山西省各县区的能源消费碳排放量,进而计算 出各类主体功能区的碳排放量。

结果表明各类主体功能区的碳排放存在显著差异,研究期间碳排放量及其增长率始终表现为重点开发区 域>农产品主产区>重点生态功能区的特征,碳排放量与各区域的经济发展呈现正相关性。山西省碳排放总 体差异表现为下降趋势,主体功能区之间的差异,尤其是重点开发区域和重点生态功能区之间的差异,是山西 省碳排放总体差异的主要来源,各主体功能区之间经济发展程度不同、能源消费需求量不同导致了各区域间 碳排放量的差异。碳排放强度的趋势分析可以用于评价碳减排成效,2006—2020 年各主体功能区碳减排均 取得一定成效且具有空间差异性。

参考文献(References):

- [1] Khandekar M L, Murty T S, Chittibabu P. The global warming debate: a review of the state of science. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162 (8): 1557-1586.
- [2] Huang M T, Zhai P M. Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(2): 281-286.
- [3] 尹彩春,赵文武.应对气候和生态环境危机 促进全球可持续发展——UNEP 与自然和谐共处报告简述.生态学报,2021,41(23): 9536-9542.
- [4] 樊杰. 主体功能区战略与优化国土空间开发格局. 中国科学院院刊, 2013, 28(2): 193-206.

[6] Koilakou E, Hatzigeorgiou E, Bithas K. Carbon and energy intensity of the USA and Germany. A LMDI decomposition approach and decoupling

^[5] 曲建升,曾静静,张志强.国际主要温室气体排放数据集比较分析研究.地球科学进展,2008,23(1):47-54.

analysis. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(5): 12412-12427.

- [7] Fang G, Wang L, Gao Z, Chen J, Tian L. How to advance China's carbon emission peak- A comparative analysis of energy transition in China and the USA. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(47): 71487-71501.
- [8] Dong F, Zhu J, Li Y F, Chen Y H, Gao Y J, Hu M Y, Qin C, Sun J J. How green technology innovation affects carbon emission efficiency: evidence from developed countries proposing carbon neutrality targets. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29 (24): 35780-35799.
- [9] Zhang F, Wang X Y, Liu G. Allocation of carbon emission quotas based on global equality perspective. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(35): 53553-53568.
- [10] 程叶青,王哲野,张守志,叶信岳,姜会明.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量.地理学报,2013,68(10):1418-1431.
- [11] Meng Z S, Wang H, Wang B N. Empirical analysis of carbon emission accounting and influencing factors of energy consumption in China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(11): 2467.
- [12] 王雅晴,谭德明,张佳田,孟楠,韩宝龙,欧阳志云.我国城市发展与能源碳排放关系的面板数据分析.生态学报,2020,40(21): 7897-7907.
- [13] Wang J N, Cai B F, Zhang L X, Cao D, Liu L C, Zhou Y, Zhang Z S, Xue W B. High resolution carbon dioxide emission gridded data for China derived from point sources. Environmental Science & Technology, 2014, 48(12): 7085-7093.
- [14] Cai B F, Liang S, Zhou J, Wang J N, Cao L B, Qu S, Xu M, Yang Z F. China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 232-239.
- [15] 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉.县域尺度的京津冀都市圈 CO2排放时空演变特征.环境科学,2014,35(1):385-393.
- [16] 朱松丽, 汪航, 王文涛, 周湘, 刘燕华. "十二五" 期间中国区域低碳经济与国土空间开发格局的协调发展研究. 中国人口・资源与环境, 2017, 27(9): 135-142.
- [17] Long Z, Pang J X, Li S K, Zhao J Y, Yang T, Chen X P, Zhang Z L, Sun Y Q, Lang L X, Wang N F, Shi H Y, Wang B. Spatiotemporal variations and structural characteristics of carbon emissions at the County scale: a case study of Wu'an City. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(43): 65466-65488.
- [18] 苏泳娴, 陈修治, 叶玉瑶, 吴旗韬, 张虹鸥, 黄宁生, 匡耀求. 基于夜间灯光数据的中国能源消费碳排放特征及机理. 地理学报, 2013, 68(11): 1513-1526.
- [19] Chen J D, Gao M, Cheng S L, Hou W X, Song M L, Liu X, Liu Y, Shan Y L. County-level CO₂ emissions and sequestration in China during 1997—2017. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-12.
- [20] 王正,周侃,樊杰.西部地区县域碳排放核算及主体功能区解析——以四川省为例.生态学报,2022,42(21):8664-8674.
- [21] 谭显春,赖海萍,顾佰和,涂唐奇,李辉.主体功能区视角下的碳排放核算——以广东省为例.生态学报,2018,38(17):6292-6301.
- [22] Xia S Y, Yang Y. Examining spatio-temporal variations in carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on major functional zones. Journal of Geographical Sciences, 2022, 32(10): 1911-1934.
- [23] 舒娱琴. 中国能源消费碳排放的时空特征. 生态学报, 2012, 32(16): 4950-4960.
- [24] 田云,林子娟.巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究.自然资源学报, 2021, 36(4): 921-933.
- [25] 山西省人民政府关于印发《山西省主体功能区规划》的通知.(2014-4-10)[2023-1-30].https://www.shanxi.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkzl/ fdzdgknr/lzyj/szfwj/202205/t20220513_5976013.shtml.
- [26] Shan Y L, Guan D B, Liu J H, Mi Z F, Liu Z, Liu J R, Schroeder H, Cai B F, Chen Y, Shao S, Zhang Q. Methodology and applications of city level CO₂ emission accounts in China. Journal of Cleaner Production, 2017, 161: 1215-1225.
- [27] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, Mei Z A. Urbanization, land use change, and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region. Sustainable Cities and Society, 2021, 66: 102701.
- [28] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, Shao S, Guan D B. An emissions-socioeconomic inventory of Chinese Cities. Scientific Data, 2019, 6(1): 1-10.
- [29] Liu Z, Guan D B, Wei W, Davis S J, Ciais P, Bai J, Peng S S, Zhang Q, Hubacek K, Marland G, Andres R J, Crawford-Brown D, Lin J T, Zhao H Y, Hong C P, Boden T A, Feng K S, Peters G P, Xi F M, Liu J G, Li Y, Zhao Y, Zeng N, He K B. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China. Nature, 2015, 524(7565): 335-338.
- [30] Zhao M, Zhou Y Y, Li X C, Zhou C H, Cheng W M, Li M C, Huang K. Building a series of consistent night-time light data (1992—2018) in Southeast Asia by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(3): 1843-1856.
- [31] Shan Y, Guan D, Zheng H R, Ou J M, Li Y, Meng J, Mi Z, Liu Z, Zhang Q. China CO₂ emission accounts 1997—2015. Scientific Data, 2018, 5: 170201.
- [32] Xia S Y, Shao H Y, Wang H, Xian W, Shao Q F, Yin Z Q, Qi J G. Spatio-temporal dynamics and driving forces of multi-scale CO₂ emissions by integrating DMSP-OLS and NPP-VIIRS data; a case study in Beijing-Tianjin-Hebei, China. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4799.
- [33] Chen J D, Xu C, Wang Y Z, Li D, Song M L. Carbon neutrality based on vegetation carbon sequestration for China's Cities and counties: trend, inequality and driver. Resources Policy, 2021, 74: 102403.
- [34] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio. Empirical Economics, 1997, 22(4): 515-531.
- [35] 李炜. 山西省农业温室气体排放量估算及影响因素分析[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [36] 赵文婷,罗淑贞,原晓红,张强,杨方社,刘跃廷,谢文豪.山西省县域碳排放时空格局及影响因素分析.环境科学与技术,2022,45 (8):226-236.
- [37] 山西省社会科学院(省政府发展研究中心)课题组,王云珠.扎实推进山西能源革命综合改革试点.前进,2020,235(7):42-45.
- [38] 王少剑,苏泳娴,赵亚博.中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素.地理学报,2018,73(3):414-428.
- [39] 周璞, 刘天科, 沈悦, 周静. 基于生态位理论的国土空间功能发展绩效评价——以山西省主体功能区为例. 中国国土资源经济, 2021, 34 (9): 40-46.